

**Arbeitspaket „Prognoseverfahren“**



**Ausbreitung und Modellierung**

***neue Schallausbreitungsmodelle***

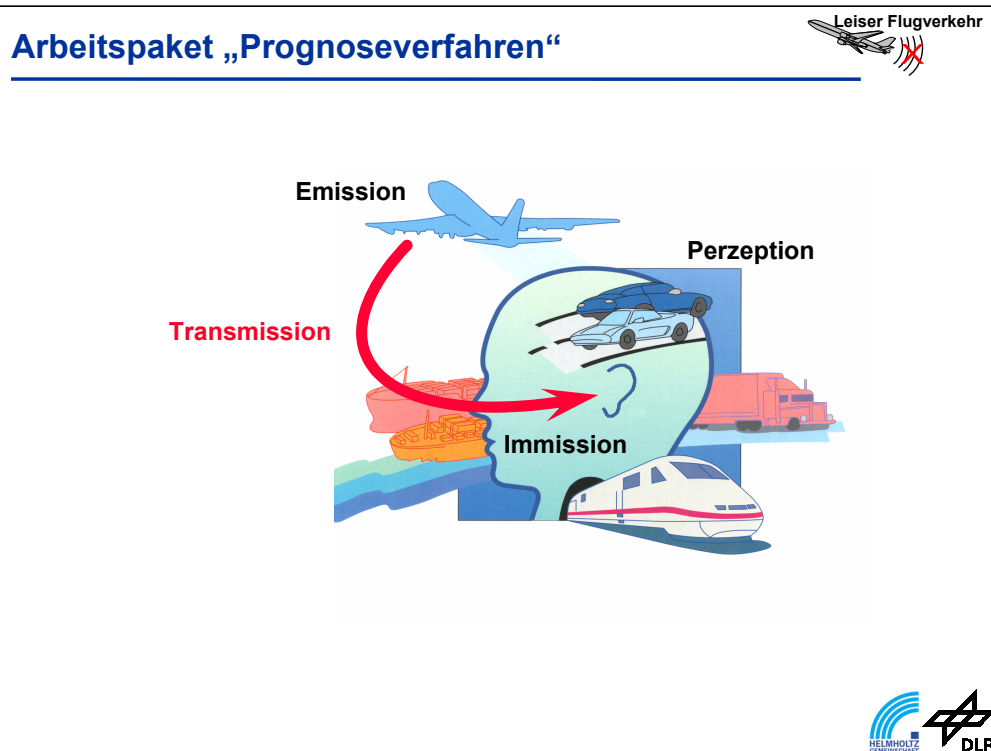
Dietrich Heimann, Reinhard Blumrich

**DLR - Institut für Physik der Atmosphäre (IPA)**  
Oberpfaffenhofen



Dr. habil. Dietrich Heimann  
DLR Institut für Physik der Atmosphäre  
Oberpfaffenhofen  
82234 Weßling  
Tfn: 08153 - 28 - 2508  
Tfx: 08153 - 28 - 1841  
eMail: [d.heimann@dlr.de](mailto:d.heimann@dlr.de)  
WWW: <http://www.dlr.de/ipa>

Dr. Reinhard Blumrich  
DLR Institut für Physik der Atmosphäre  
Oberpfaffenhofen  
82234 Weßling  
Tfn: 08153 - 28 - 1325  
Tfx: 08153 - 28 - 1841  
eMail: [reinhard.blumrich@dlr.de](mailto:reinhard.blumrich@dlr.de)  
WWW: <http://www.dlr.de/ipa>



Der Vortrag befasst sich mit der Schallausbreitung (Transmission) durch die Atmosphäre und die Möglichkeit ihrer Berechnung mit Simulationsmodellen.

Die Transmission bestimmt zusammen mit der Emission die Immission, d.h. den Lärmpegel am Empfänger.

## Arbeitspaket „Prognoseverfahren“

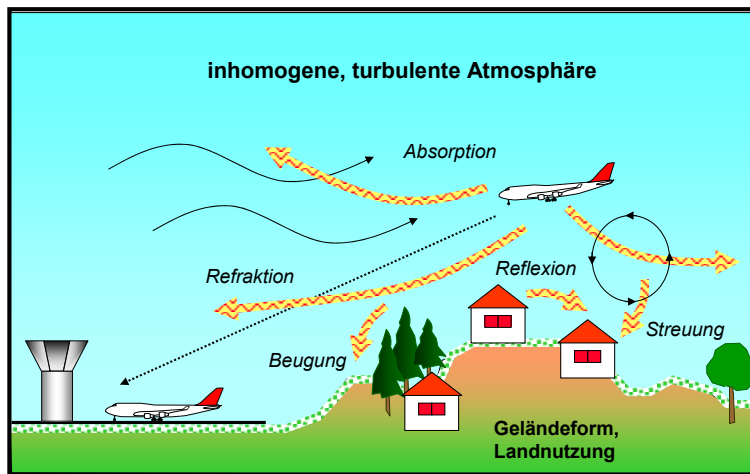
---



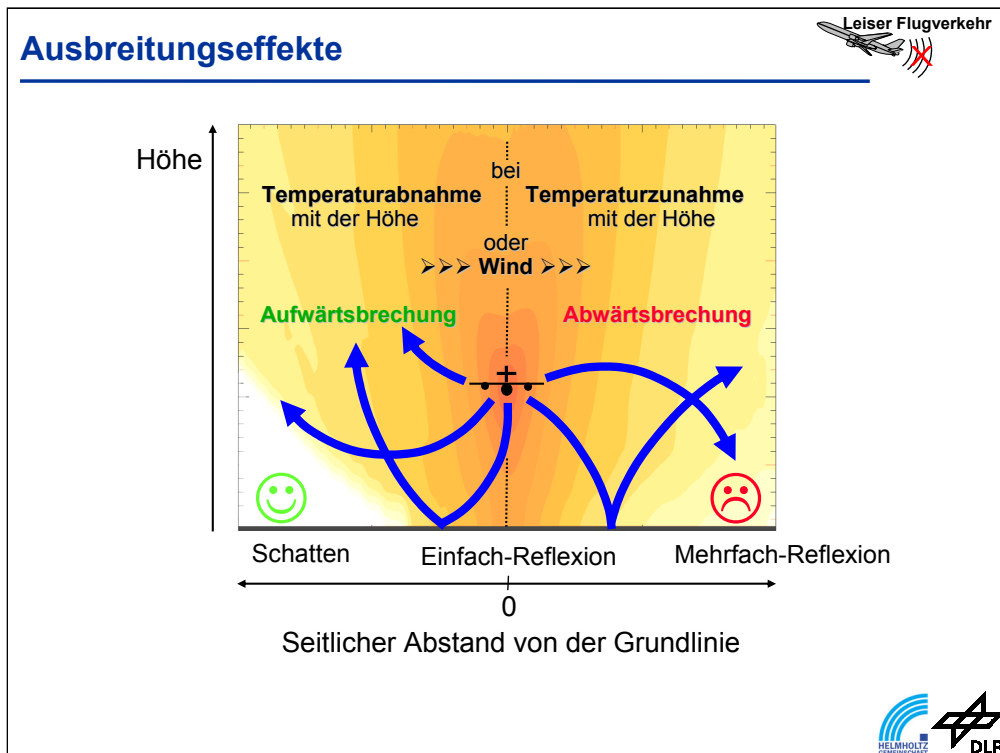
1. Ausbreitungseffekte
2. Ausbreitungsmodelle
3. Vorgehensweise



## Ausbreitungseffekte



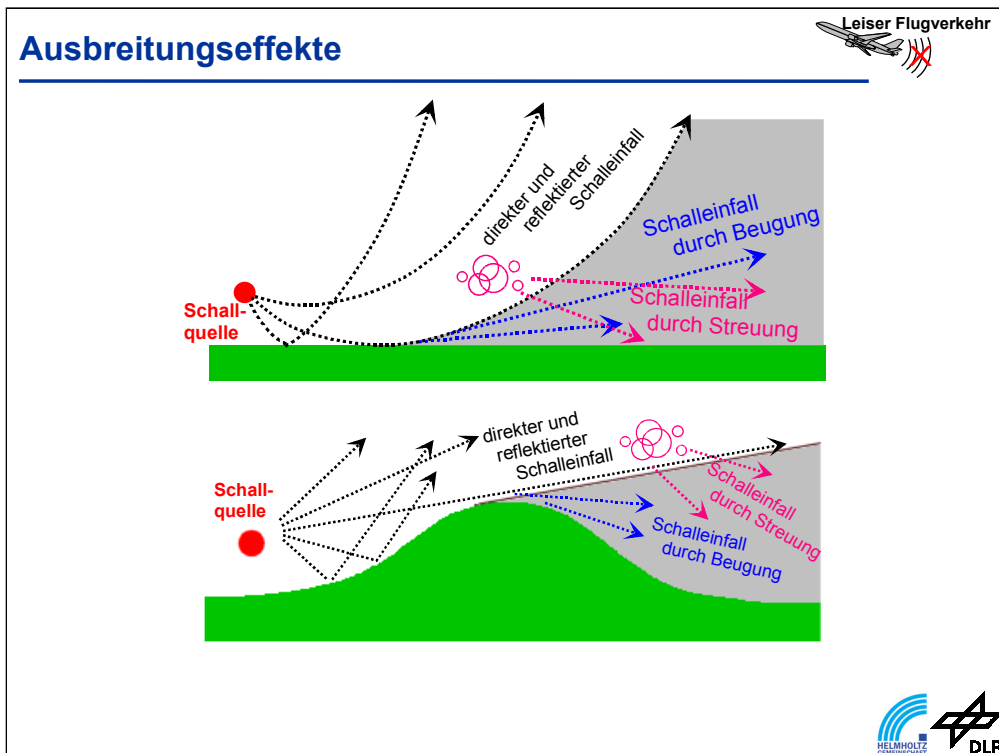
Die schematische Übersicht zeigt die relevanten Prozess und die Einflussfaktoren auf die Schallausbreitung im Freien.



Ein wichtiger wetterabhängiger Prozess ist die Brechung (Refraktion) von Schallwellen. Sie entsteht, wenn die effektive Schallgeschwindigkeit von der Höhe abhängt.

Die schematische Darstellung zeigt die Bildung einer Schattenzone mit starker Schalldämpfung bei Aufwärtsbrechung (linke Bildhälfte), bzw. von Mehrfachreflexionen und guten Ausbreitungsbedingungen bei Abwärtsbrechung (rechte Bildhälfte).

Aufwärtsbrechung entsteht bei Abnahme der effektiven Schallgeschwindigkeit mit der Höhe. Dies ist bei Temperaturabnahme mit der Höhe und/oder Schallausbreitung gegen den Wind der Fall. Umgekehrt entsteht Abwärtsbrechung bei einer Temperaturzunahme mit der Höhe (Inversion) und/oder Schallausbreitung mit dem Wind.



Beugung (Diffraktion) und turbulenzbedingte Streuung von Schallwellen bewirken einen Eintrag von Schallenergie auch in Schattenzonen (oben: refraktionsbedingte Schattenzonen; unten: Abschattung durch Geländeform), sodass in diesen die Schallquelle nicht völlig unhörbar, sondern lediglich deutlich leiser ist.

## Ausbreitungseffekte



### Natürliche Dämpfungseffekte der Ausbreitung:

Entfernung von der Quelle: ☺  $L_{max}$  - 6 dB  
☺  $L_{eq}$  - 3 dB je Abstandsverdoppelung

#### zusätzlich:

Absorption: ☺ - 1 dB je 100 m (1000 Hz)  
☺ - 5 dB je 100 m (4000 Hz)

Bodeneffekte: ☺ - 10 dB bei flachem Schalleinfall

Refraktion: ☺ - 25 dB bei Aufwärtsbrechung

☹ + 6 dB bei Abwärtsbrechung

Streuung, Diffraktion ☹ Limitierung der Dämpfung  
in Schattenzonen auf ca. - 25 dB

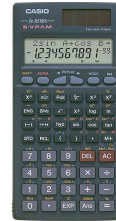
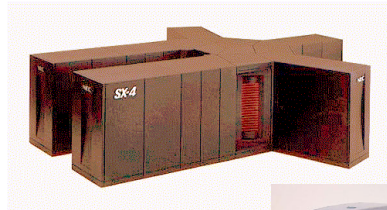


Die Tabelle zeigt die relative Bedeutung der verschiedenen Einflussfaktoren auf die Dämpfung der Schalldruckamplitude während der Ausbreitung durch die Atmosphäre. Negative Werte bedeuten eine Reduktion der Schalldruckamplitude und somit eine Minderung der Lärmimmission.

## Arbeitspaket „Prognoseverfahren“



1. Ausbreitungseffekte
2. Ausbreitungsmodelle
3. Vorgehensweise



Schallausbreitungsmodelle dienen der Berechnung der Transmission (durch die Atmosphäre) und der Vorhersage der Immission bei Kenntnis der Emission.

Es gibt eine große Vielzahl von Berechnungsverfahren und numerischen Modellen der Schallausbreitung. Sie unterscheiden sich durch die Anzahl der berücksichtigten Prozesse, die Genauigkeit und den Rechenaufwand.



## Schallausbreitungsmodelle



1. Standard-Verfahren (z.B. ISO 9613, AzB)

$$L = L_{Quelle} - 20 \log \left( \frac{d}{d_o} \right) - \sum \Delta L$$



Abstandsmaß + Dämpfungskorrekturen

*Atmosphäreneffekte nur pauschal oder gar nicht erfasst*

2. Numerische Modelle (z.B. Euler-Modell)

$$\frac{\partial \mathbf{U}''}{\partial t} = -(\mathbf{U}_{met} \cdot \nabla) \mathbf{U}'' - (\mathbf{U}'' \cdot \nabla) \mathbf{U}_{met} - \alpha_{met} \nabla p'' - \alpha'' \nabla p_{met}$$

$$\frac{\partial p''}{\partial t} = -\mathbf{U}_{met} \cdot \nabla p'' - \mathbf{U}'' \cdot \nabla p_{met} - \kappa p_{met} \nabla \cdot \mathbf{U}'' - \kappa p'' \nabla \cdot \mathbf{U}_{met}$$



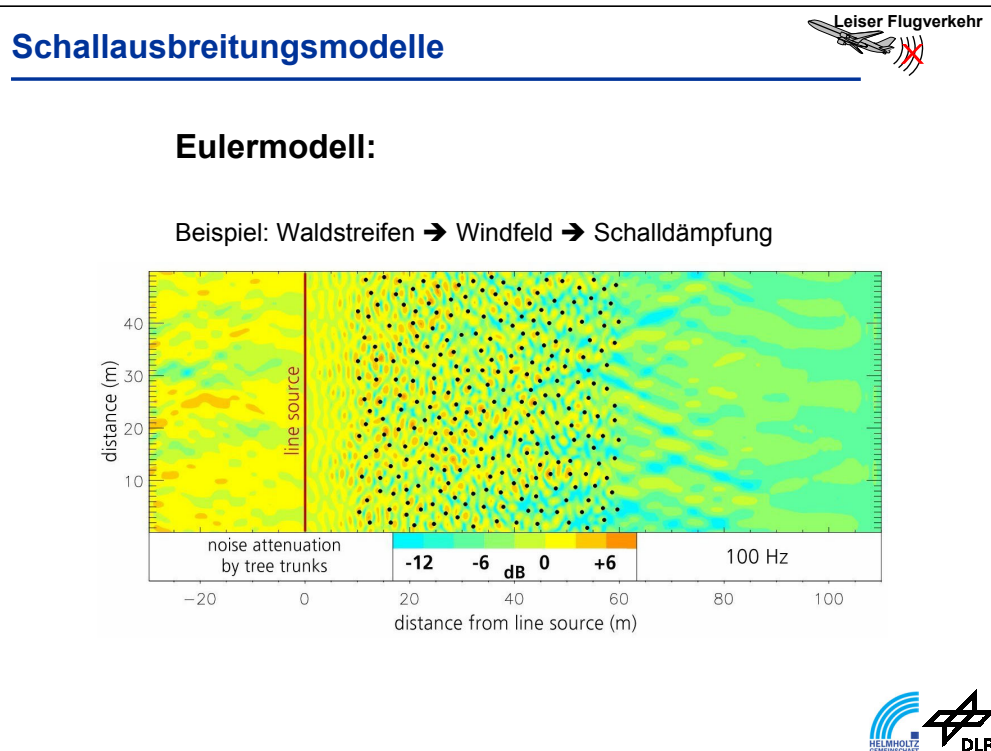
*je mehr Effekte, umso genauer,  
aber auch umso aufwändiger*



Standard-Schallausbreitungsmodelle, wie sie in Richtlinien, Normen oder Verordnungen festgeschrieben sind, berechnen den Schallpegel an einem Empfänger als eine Summe von Pegelabschlägen, die vom Emissions-Schallpegel subtrahiert werden. Neben dem entfernungsbedingten Abschlag (Abstandsmaß) werden diverse weitere Abschläge berücksichtigt. Mit Ausnahme der Schallabsorption gehen meteorologische Effekte und Bodeneffekte dabei in der Regel nur pauschal, d.h. nicht bezogen auf Einzelsituationen, ein.

Mit Hilfe numerischer Modelle lassen sich die physikalischen Prozesse der Schallausbreitung, einschließlich der meteorologischen Einflüsse, simulieren. Viele Modelle basieren auf einer Lösung der Helmholtz-Gleichung bezüglich des komplexen Schalldrucks (Berücksichtigung von Amplitude und Phase) im Frequenzraum. Diese Modelle sind allerdings bezüglich der Geometrie und der Meteorologie eingeschränkt.

Die Euler-Modelle, die auf der linearisierten Eulergleichung beruhen, sind dies nicht. Sie sind universelle Werkzeuge und simulieren die Ausbreitung der Schalldruckwellen zeitabhängig auf einem engmaschigen Gitter. Ein gravierender Nachteil der Euler-Modelle ist es aber, dass sie sehr rechenaufwändig sind.



... Bis dahin lassen sich Euler-Modelle für Prozessstudien und Sonderfälle einsetzen. Ein Hauptzweck erfüllen sie dabei als Referenz für vereinfachte Verfahren.

Das Bild zeigt die Dämpfung von Schallwellen einer Frequenz von 100Hz durch eine 50 m breiten Waldstreifen.

## Schallausbreitungsmodelle



### Eulermodell:

Anwendung auf Flughafennahbereich?



Euler-Modelle stellen derzeit die fortschrittlichsten Schallausbreitungsmodelle dar. Am DLR-IPA wurde ein solches Modell entwickelt. Es ist das erste akustische Modell dieser Art, das auf Probleme der Schallausbreitung im Freien unter Einschluss meteorologischer Aspekte angewandt wurde.

## Schallausbreitungsmodelle



### Eulermodell:

Anwendung auf Flughafennahbereich:  $10 \times 5 \times 1 \text{ km}^3$

1000 Hz:

notwendige Maschenweite: 3,4 cm

Anzahl der Modellmaschen:  $1,2 \cdot 10^{15}$

numerisch notwendiger Zeitschritt: 100  $\mu\text{s}$

Anzahl der Zeitschritte: 300,000

Rechenzeit (NEC SX4) je Masche und Zeitschritt: 1  $\mu\text{s}$



Die Gesetze der numerischen Mathematik verlangen allerdings, dass eine Wellenlänge mit etwa 10 Gitterpunkten aufgelöst werden muss. Der numerische Zeitschritt wiederum darf den Quotienten aus Maschenweite und Schallausbreitungsgeschwindigkeit nicht überschreiten.

Dadurch ergibt sich je nach Frequenz und Gebietsgröße ein hoher Rechenaufwand (Rechenzeit und Speicheranforderung), ...



### Eulermodell:

Anwendung auf Flughafennahbereich:  $10 \times 5 \times 1 \text{ km}^3$

1000 Hz:

notwendige Maschenweite: 3,4 cm

Anzahl der Modellmaschen:  $1,2 \cdot 10^{15}$  = 144 PByte

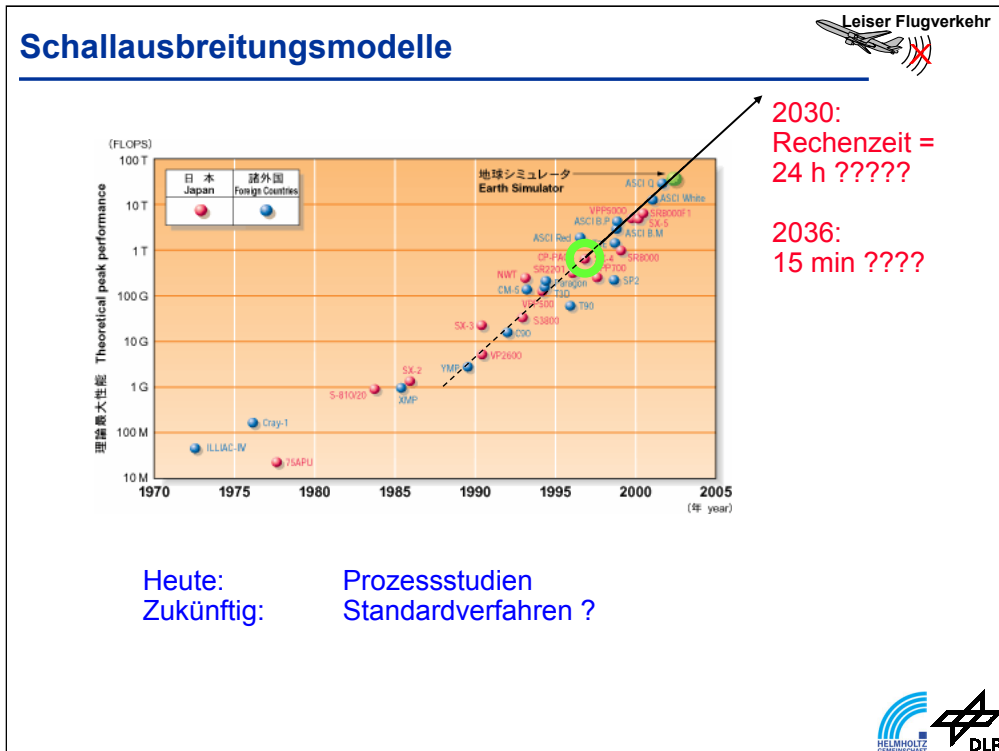
numerisch notwendiger Zeitschritt: 100  $\mu\text{s}$

Anzahl der Zeitschritte: 300,000

Rechenzeit (NEC SX4) je Masche und Zeitschritt: 1  $\mu\text{s}$

Gesamt-Rechenzeit: 360 Ts = 11 Millionen Jahre





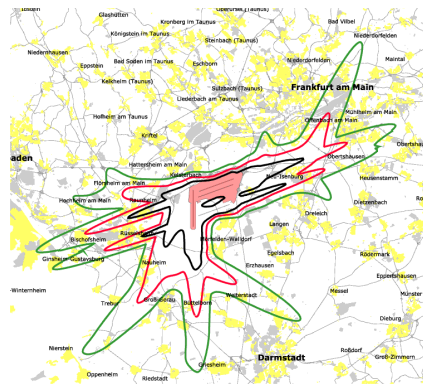
Falls sich die Kapazität der Rechenanlagen zukünftig etwa in der gleichen Rate steigern lässt wie in den letzten beiden Dekaden (etwas Faktor 10 in 3 Jahren), so können Euler-Modelle in einigen Jahrzehnten durchaus Praxisrelevanz erlangen. Auch die Entwicklung effizienterer numerischer Verfahren könnte diesen Prozess beschleunigen.

...

Arbeitspaket „Prognoseverfahren“



1. Ausbreitungseffekte
2. Referenzmodelle
3. Vorgehensweise



Im letzten Abschnitt des Vortrags wird erläutert, wie Schallausbreitungsmodelle für die Verbesserung von Lärmprognoseverfahren im Flughafen-Nahbereich, z.B. zur Berechnung von Lärm-Konturen, verwendet werden können.

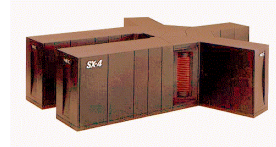
## Vorgehensweise



### Vorgehensweise:

#### numerische Modelle ...

- ... weiterentwickeln und
- ... als Referenz verwenden



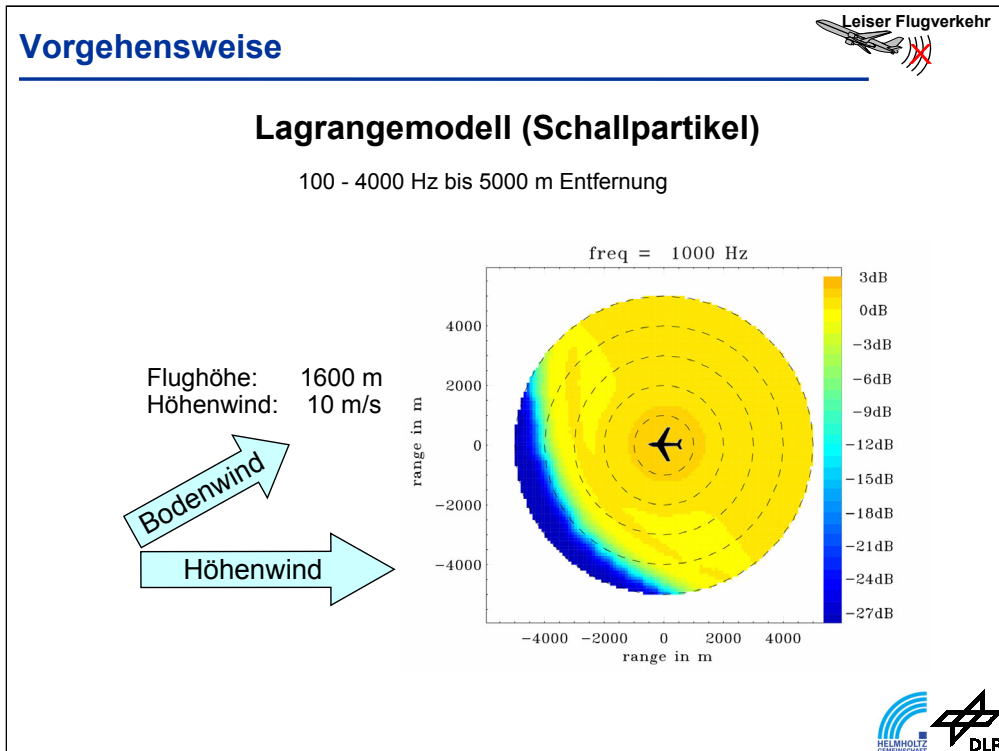
#### vereinfachte Verfahren ableiten mit dem Ziel:

- Genauigkeit gegenüber Standardverfahren steigern
- Handhabbarkeit beibehalten



Die numerischen Modelle werden weiterentwickelt, sodass sie dem Stand der Wissenschaft entsprechen. Sie werden als Referenz für vereinfachte Verfahren verwendet, die gegenüber den gegenwärtigen Standardverfahren eine höhere Genauigkeit aufweisen, ohne dass deren Handhabbarkeit verloren geht.





Lagrange-Modelle, bei denen Schallträger (Schallpartikel) auf Schallstrahlen verfolgt werden, sind nicht so rechenzeitintensiv wie Euler-Modelle. Sie haben allerdings den Nachteil, dass Beugungseffekte (Schalleintrag in Schattenzonen) nicht explizit berechnet werden können. Dieser Prozess muss parametrisiert werden, wobei das Eulermodell hilfreich ist.

Das Beispiel zeigt den Meteorologie- und Bodeneffekt auf den bodennahen Schallpegel unterhalb eines Flugzeugs, das sich in 1600 m über Grund befindet. Bei Ausbreitung gegen den Wind beginnt in etwa 4 km Entfernung vom Fußpunkt des Flugzeugs eine akustische Schattzone (blau), in der der Schallpegel gegenüber ungestörter Ausbreitung um bis zu 25 dB abfällt.

## Vorgehensweise



### Umsetzung:

Prinzip der Standardverfahren beibehalten:

$$L = L_{Quelle} - 20 \log \left( \frac{d}{d_o} \right) - \Delta L_{MB} + \sum \Delta L$$

Zusatzdämpfung  $\Delta L_{MB}$  auf Grund von Meteorologie- und Bodeneffekten für viele Situationen mit dem Lagrange-Modell vorausberechnen und in Tabellen ablegen.

Vorteil: kaum Einbußen an Rechengeschwindigkeit



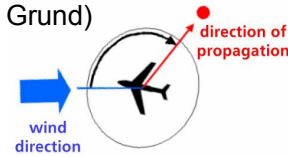
Weiterer Aufwand kann eingespart werden, wenn die Meteorologie- und Bodeneffekte vorausberechnet werden und in numerischen Tabellen abgelegt werden. Auf diese Tabellen können Standard-Verfahren zugreifen und je nach Situation auswählen. Die berechneten Werte können dann wie die übrigen Zusatzdämpfungen behandelt werden (siehe Arbeitspaket 5A).

## Vorgehensweise



### Unabhängige Parameter:

- 7 Klassen der Flughöhe über Grund
- 8 Klassen der Entfernung zur Flugzeug-Grundposition
- 6 Klassen der Windgeschwindigkeit (10 m ü. Grund)
- 12 Klassen des Winkels zwischen Ausbreitungsrichtung und Windrichtung
- 3 Klassen der Temperaturschichtung (Stabilitätsklassen)
- 8 Frequenz-Klassen (Oktavbänder)

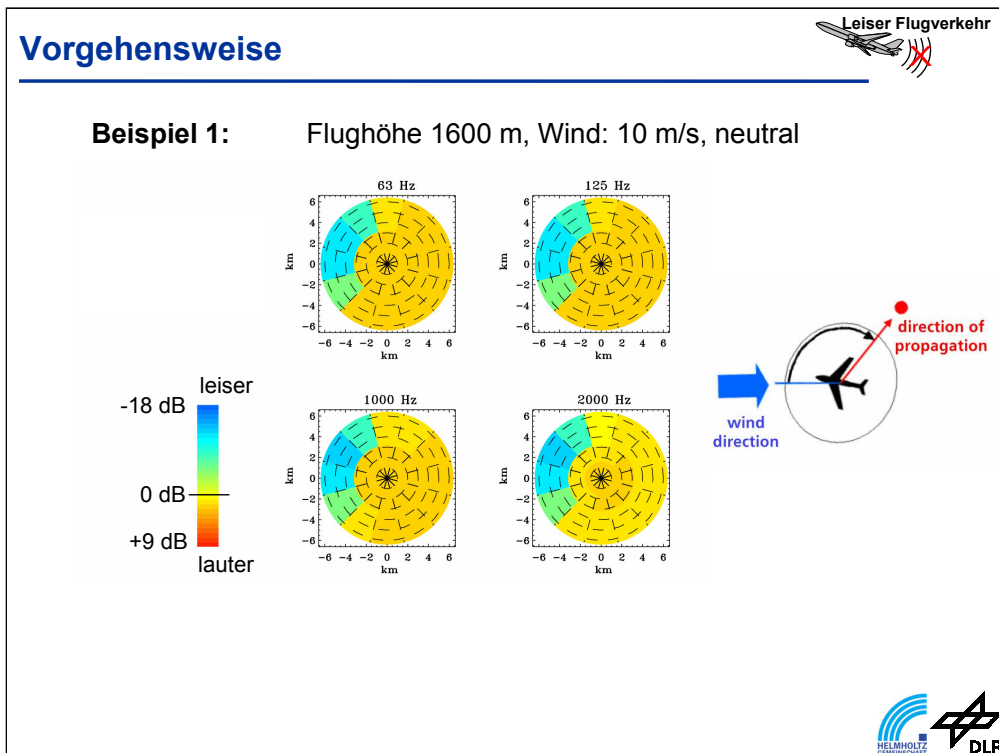


→ 64,512 Kombinationen



Die Tabellenwerte der Korrekturen auf Grund der Meteorologie- und Bodeneffekte wurden für 64512 Kombinationen von Einflussfaktoren durchgeführt. Die Einflussfaktoren lassen sich aus der Flugzeugposition und zugänglichen meteorologischen Daten (Wetterstation) bestimmen.

Unter der Annahme ebenen Geländes lassen sich die Tabellenwerte auf alle Flughäfen und meteorologischen Situationen anwenden.

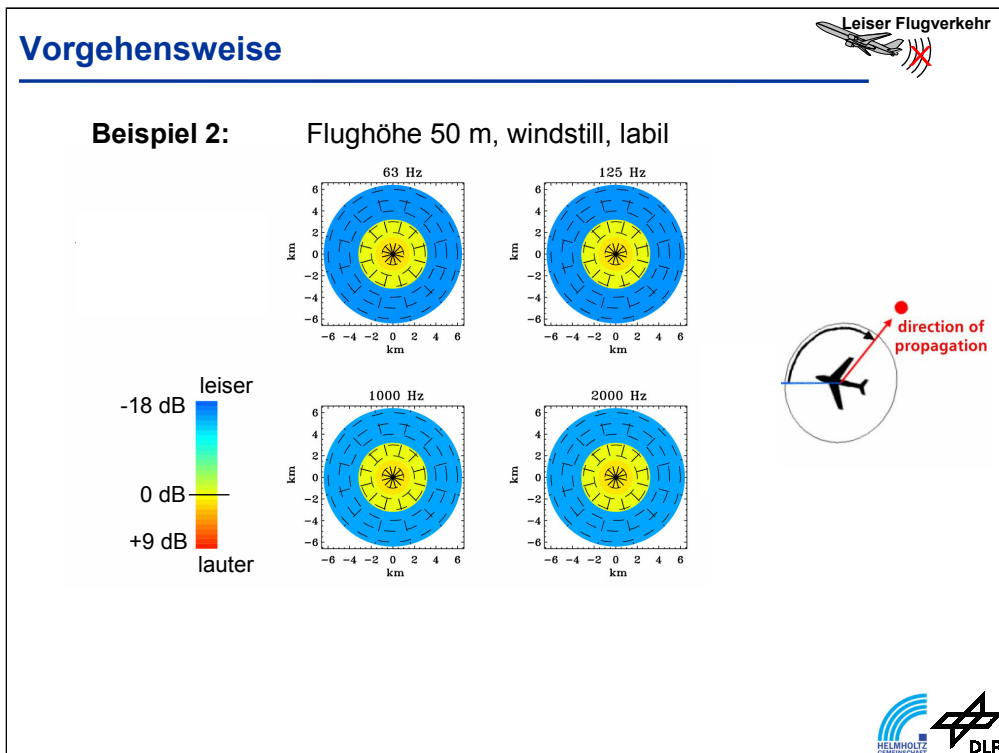


Die folgenden drei Folien zeigen die Visualisierung einer kleinen Auswahl vorausberechneter Korrekturwerte für den Meteorologie- und Bodeneffekt.

1. Beispiel :

Die Flughöhe beträgt 1600 m über Grund und es weht am Boden ein starker Wind mit 10 m/s. Bei einer derartigen Windgeschwindigkeit ist die Atmosphäre in der Regel vertikal gut durchmischt, d.h. die Temperaturschichtung ist neutral mit einer Temperaturabnahme von ca. 1 Kelvin je 100 m Höhe.

Trotz der großen Flughöhe bildet sich bei Ausbreitung gegen den starken Wind in etwa 3 km Entfernung vom Flugzeugfußpunkt eine akustische Schattenzone (blau).

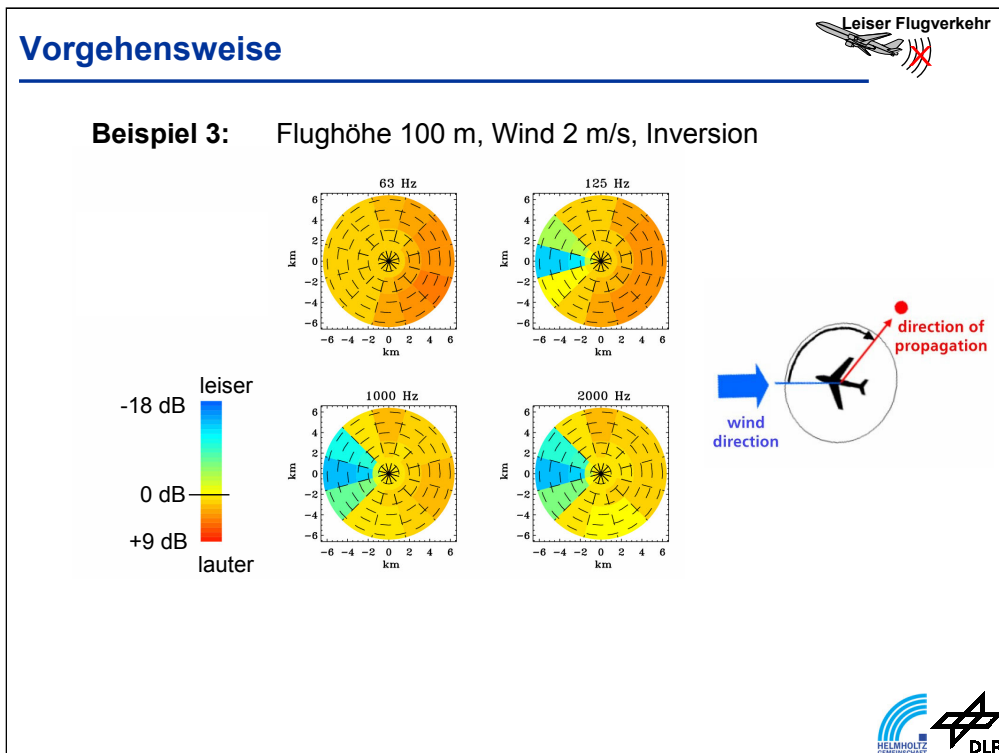


## 2. Beispiel:

Die Flughöhe beträgt nun lediglich 50 m über Grund und es ist windstill.

Bei Windstille oder schwachem Wind und hoher Sonneneinstrahlung ist die Atmosphäre labil geschichtet und sehr turbulent, wobei die Temperatur in den unteren 500 m um mehr als 1 Kelvin je 100 m Höhe abnimmt.

Wegen der Windstille ist die Dämpfung unabhängig von der Ausbreitungsrichtung. Wegen der niedrigen Flughöhe bildet sich nach 2-3 km Entfernung vom Flugzeug-Fußpunkt ein akustischer Schatten.



3. Beispiel :

Die Flughöhe beträgt 100 m über Grund und es weht ein schwacher Wind mit 2 m/s. Bei Windstille oder schwachem Wind und klaren Nächten ist die Atmosphäre stabil geschichtet, wobei die Temperatur häufig mit der Höhe zunimmt (Inversion).

In dieser Situation bildet sich kaum ein akustischer Schatten. Vor allem die tiefen Frequenzen werden infolge von Mehrfachreflexionen in Windrichtung verstärkt.

## Arbeitspaket „Prognoseverfahren“



### Zusammenfassung:

- Fortschritte in der Entwicklung aufwändiger Schallausbreitungsmodelle
- Ableitung eines vereinfachten Verfahrens
- Erstellung von vorberechneten Tabellenwerten der Meteorologie-Boden-Dämpfung für den Einsatz von Standard-Verfahren



Zusammenfassen lässt sich sagen, dass ...

... Fortschritte in der Entwicklung umfassender und genauer, damit aber auch aufwändiger Schallausbreitungsmodelle erzielt wurden,

...

## Arbeitspaket „Prognoseverfahren“



### Zusammenfassung:

- Fortschritte in der Entwicklung aufwändiger Schallausbreitungsmodelle
- Ableitung eines vereinfachten Verfahrens
- Erstellung von vorberechneten Tabellenwerten der Meteorologie-Boden-Dämpfung für den Einsatz von Standard-Verfahren



... ein vereinfachtes Verfahren abgeleitet werden konnte, dass viele für die Schallausbreitung relevante Prozesse, insbesondere die Refraktion, berücksichtigen kann und dass ...



## Arbeitspaket „Prognoseverfahren“



### Zusammenfassung:

- Fortschritte in der Entwicklung aufwändiger Schallausbreitungsmodelle
- Ableitung eines vereinfachten Verfahrens
- Erstellung von vorberechneten Tabellenwerten der Meteorologie-Boden-Dämpfung für den Einsatz von Standard-Verfahren



... Werte der Meteorologie- und Bodendämpfung für eine große Anzahl von Situationen vorausberechnet und in Tabellen abgelegt werden konnten, auf die entsprechend erweiterte Standard-Verfahren der Lärmprognose nun zugreifen können.

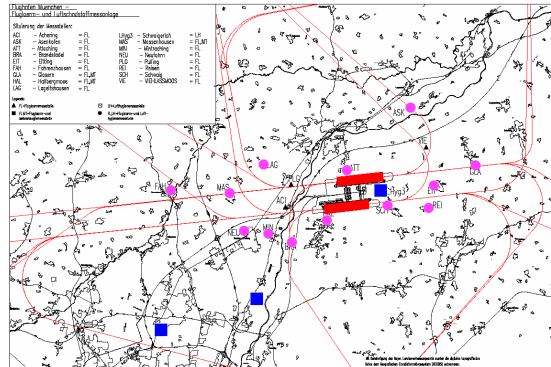
Arbeitspaket „Prognoseverfahren“



Validierung ...

... anhand von 1 Jahr Monitoring am Flughafen München (2003)

- 6 Flugzeugtypen, 180,000 Lärm-Messungen (FMG)
- Flugzeugpositionen (DFS)
- Meteorologie (DWD, Uni München, FMG)



- Lärm
- Meteo



Die Validierung des Verfahrens steht noch aus und soll mit Hilfe von Daten durchgeführt werden, die im Rahmen des Projekts LAnAb („Lärmoptimierte An- und Abflugverfahren“) im Forschungsverbund Leiser Verkehr gesammelt bzw. gewonnen werden.